

## ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

**Две формы существования разряда униполярного пробоя газа**

А. К. Сухов

*Костромской госуниверситет имени Н. А. Некрасова. Россия, 156961, г. Кострома, ул. 1 Мая, д. 14.  
E-mail: suhov\_andrei@mail.ru*

Статья поступила 03.10.2012, подписана в печать 26.12.2012.

Экспериментально установлено существование двух форм разряда униполярного пробоя газа в зависимости от частоты следования и полярности прикладываемых высоковольтных импульсов. Формы отличаются интенсивностями, распределением свечения по длине разряда и вольт-амперными характеристиками. Переход от одной формы разряда к другой происходит в узком диапазоне частот и обусловлен пробоем приэлектродного слоя в некотором критическом поле при включении процессов ионно-электронной эмиссии. Частота перехода растет с увеличением давления газа и уменьшением амплитуды импульсов. В области перехода наблюдается развитие неустойчивости разряда и гистерезис его параметров.

*Ключевые слова:* разряд униполярного пробоя газа, формы разряда, высоковольтные импульсы потенциала, частота следования импульсов, свечение, вольтамперная характеристика, неустойчивость разрядного столба, гистерезис.

УДК: 537.525. PACS: 52.50.Dg, 52.50.Nr, 52.80.-s, 52.80.Tn.

**Введение**

Общеизвестно существование двух форм емкостных высокочастотных разрядов, различающихся ионизационными процессами в приэлектродных слоях [1]. В данной работе исследуются условия существования различных форм разряда униполярного пробоя газа (УПГ) [2–4], возбуждаемого в трубке с разреженным газом высоковольтными импульсами одной полярности, прикладываемыми к единственному покрытию-электроду (ПЭ).

Импульсно-периодические высоковольтные разряды широко используются для создания активных сред электроразрядных технологических лазеров, плазмохимических генераторов и т. п. благодаря возможности регулирования в широких пределах электрического поля, концентрации заряженных частиц и обеспечения однородной ионизации во всем объеме.

Разряд УПГ, являясь безэлектродным, представляет практический интерес для создания «чистой» плазмы ввиду отсутствия металлических электродов контактирующих с разрядом. В отличие от высокочастотных разрядов УПГ имеет более низкую частоту следования импульсов и один активный электрод. Он по своей природе очень чувствителен к внешним параметрам, что позволяет использовать его для контроля технологических плазменных процессов.

В окрестности разряда УПГ формируется импульсное электрическое поле высокой напряженности, что позволяет использовать этот разряд для полевого воздействия на различные материалы и объекты. Кроме того, способ формирования разряда высоковольтными импульсами позволяет создавать условия для генерации химически активных радикалов типа монооксида углерода СО и атомарного водорода Н [4], которые имеют большое практическое применение в плазмохимии и атомно-водородной энергетике.

С феноменологической точки зрения разряд УПГ представляет интерес в том смысле, что позволяет исследовать разрядные процессы при заданной положительной или отрицательной полярности прикладываемого импульсного потенциала, управлять амплитудой и частотой следования импульсов. В результате можно выделить вклад этих параметров в разрядные процессы при различных условиях.

Предметом экспериментальных исследований в настоящей работе являются распределение свечения разряда УПГ, его вольтамперная характеристика и параметры заряженной компоненты плазмы разряда.

**1. Параметры разряда УПГ при разной частоте следования импульсов потенциала**

Разряд УПГ отличается способом возбуждения, так как высоковольтные импульсы одной (положительной или отрицательной) полярности подаются на единственный металлический покрытие-электрод, расположенный поверх стекла в разрядной трубке большой длины. Вторым электродом является земля. Вид разряда представлен на рис. 1.

Измерения параметров разряда УПГ проводились в воздухе при давлении  $p = 0.5-1$  торр. На конце разрядной трубки длиной  $l = 2.8$  м, внутренним радиусом  $r_t = 9.5$  мм расположен покрытие-электрод длиной  $l_{CE} = 2$  см из мелкой металлической сетки с ячейкой  $1 \times 1$  мм. Схема установки приведена в [3]. На покрытие-электрод с генератора подавали высоковольтные импульсы потенциала положительной полярности амплитудой до  $\phi_{CE} = 15$  кВ. Генератор позволяет изменять частоту следования импульсов  $f_i$  от 10 до 2000 Гц с шагом 10 Гц. Длительность импульсов выбиралась так, чтобы форма временной зависимости потенциала была близка к треугольной без потери амплитуды. Значение полуширины импульса при этом составило  $t_i = 3.5$  мкс.

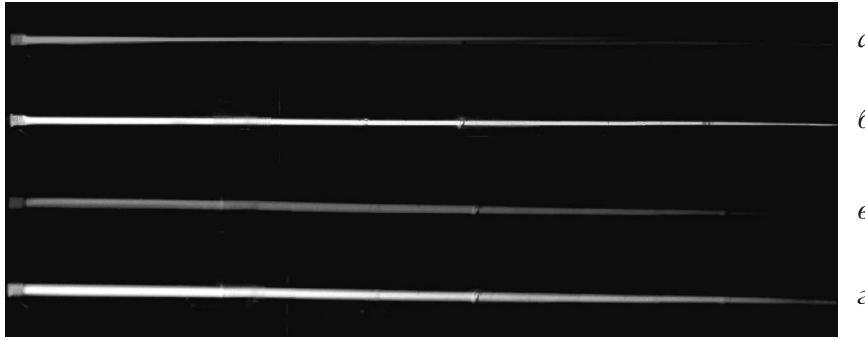


Рис. 1. Характер свечения разряда УПГ при разной частоте и полярности импульсов: положительная полярность,  $f_i = 400$  Гц (а), 2000 Гц (б); отрицательная полярность,  $f_i = 400$  Гц (в), 2000 Гц (г) (покрытие-электрод расположен слева). Амплитуда импульса  $\phi_{CE} = 15$  кВ, давление воздуха  $p = 1$  торр

Потенциал  $\phi_{CE}$  на покрытии-электроде измерялся высокоомным делителем, а ток  $i_d$ , протекающий в цепи разряда, — с помощью шунтирующего сопротивления. Сигналы потенциала и тока регистрировались двухлучевым цифровым осциллографом DSO 2100 и обрабатывались на компьютере.

Исследуемые характеристики разряда УПГ — объем области свечения и ток разряда существенно зависят от параметров его возбуждения. Область свечения разряда УПГ имеет вид конуса с основанием у ПЭ (рис. 1). Обнаружено, что при увеличении частоты следования импульсов положительной полярности наблюдается скачкообразное возрастание длины разрядного столба  $L_d$  в 6–12 раз (рис. 2) и сильное уменьшение тока разряда  $i_d$  в 1.6–1.7 раза при практически неизменной амплитуде импульсного потенциала  $\phi_{CE}$ . Для отрицательной полярности импульсов резкого изменения параметров не происходит.

Диапазон изменения частоты, где параметры разряда УПГ меняются между крайними значениями, достаточно узкий — шириной примерно 100 Гц, что говорит о пороговом характере явления. С ростом амплитуды импульсного потенциала  $\phi_{CE}$  пороговое значение частоты следования импульсов  $f_{i0}$  смещается в область более низких частот. Так, при  $\phi_{CE} = 10$  кВ пороговое значение частоты составляет  $f_{i0} = 650$  Гц и 500 Гц при  $\phi_{CE} = 15$  кВ.

Зависимости длины разряда от амплитуды при разной частоте их следования показали, что при малой частоте следования импульсов потенциала положительной полярности  $f_i < f_{i0}$  длина области свечения во всем исследованном диапазоне амплитуд импульсов достаточно мала (до 40 см). При этом ток разряда относительно других режимов (с большей частотой следования) значительно больше. Поэтому данную форму разряда УПГ будем называть сильноточной. При частоте положительных импульсов  $f_i > f_{i0}$ , начиная с некоторой амплитуды, наблюдается резкое возрастание длины области свечения разряда (более 130 см), после которого она растет более плавно. Данную форму разряда УПГ назовем слаботочной, поскольку характеризуется малыми значениями разрядного тока.

С увеличением частоты импульсов область резкого роста длины свечения разряда смещается в сторону меньших значений амплитуды импульсов, т.е. при большей частоте следования импульсов положительной

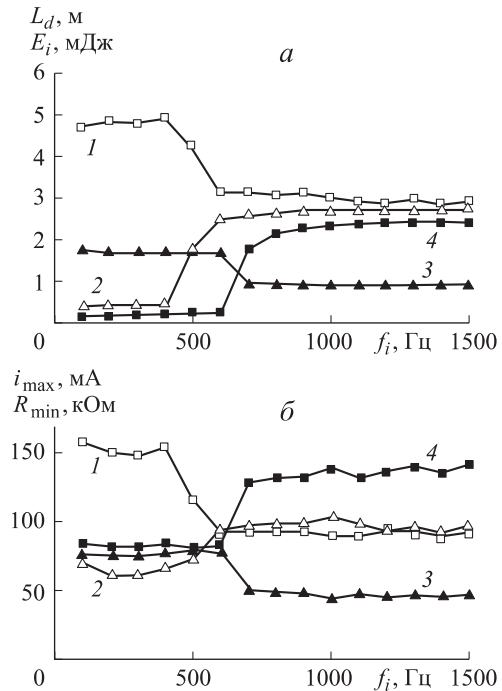


Рис. 2. Зависимости: а — вкладываемой в разряд энергии за один импульс  $E_i$  (1, 3) и длины разряда  $L_d$  (2, 4); б — максимального разрядного тока  $i_{max}$  (1, 3) и минимального сопротивления  $R_{min}$  (2, 4) от частоты следования  $f_i$  при разной амплитуде импульсов потенциала  $\phi_{CE} = 15$  кВ (1, 2) и  $\phi_{CE} = 10$  кВ (3, 4). Давление воздуха  $p = 0.5$  торр

полярности условия для развития разряда являются более благоприятными.

При повышении амплитуды импульсов потенциала отрицательной полярности длина разряда УПГ также увеличивается, но область резкого увеличения длины свечения разряда отсутствует. При этом характер возрастания длины разряда практически не зависит от частоты следования импульсов, т.е. при отрицательной полярности импульсов потенциала их частота практически не влияет на длину свечения разряда, лишь несколько изменяя его яркость. Ток разряда при отрицательных импульсах невелик и соответствует значениям тока слаботочной формы разряда для импульсов положительной полярности.

Анализ временных зависимостей электрических параметров разряда УПГ позволил установить, что ток

разряда  $i_d$  появляется после задержки на  $t \approx 0.7$  мкс от начала импульса потенциала, когда значение потенциала на покрытии-электроде достигает  $\phi_{\text{СЕ}} = 3.3$  кВ. При этом двум полупериодам тока разряда  $i_d$  соответствуют два пика мощности, вкладываемой в разряд. Прохождение тока разряда  $i_d$  через ноль наблюдается вблизи максимума импульсного потенциала  $\phi_{\text{СЕ}}$ .

Для более детального анализа поведения электрических параметров разряда УПГ предложена эквивалентная электрическая схема разряда УПГ [3], которая учитывает паразитные емкости установки, емкости стеклянной стенки разрядной трубки и пристеночных слоев. Там же получено выражение для падения напряжения на разрядном столбе  $U_d(t)$  как на активном сопротивлении  $R_a$  следующего вида:

$$U_d(t) = \varphi_{\text{СЕ}}(t) - \frac{1}{C_d} \int_0^t i_d(\tau) d\tau,$$

где  $C_d$  — емкость стеклянной стенки разрядной трубки и пристеночных слоев.

По измененным временным зависимостям тока разряда  $i_d(t)$  и потенциала на покрытии-электроде  $\phi_{\text{СЕ}}(t)$  рассчитаны зависимости от времени падения напряжения на разрядном столбе  $U_d(t)$ , активного сопротивления разрядного столба  $R_a(t)$  и активной мощности  $P_a(t)$ , вкладываемой в разряд в течение импульса. Зависимость напряжения на разряде  $U_d(t)$  в течение импульса потенциала повторяет изменение тока  $i_d(t)$ , при этом также наблюдается задержка тока разряда  $i_d(t)$  относительно начала импульса напряжения  $U_d(t)$ . На фронте импульса, когда напряжение на разряде растет, активное сопротивление разряда резко уменьшается, затем в первом полупериоде изменения напряжения активное сопротивление спадает достаточно медленно, а во втором полупериоде — практически не меняется или меняется слабо.

## 2. Вольтамперные характеристики разряда УПГ при разной частоте следования импульсов потенциала

Вид вольтамперной характеристики разряда УПГ при положительной полярности импульсов сильно зависит от частоты их следования, а при отрицательной такой зависимости не наблюдается. Ток сильноточной формы разряда превышает ток слаботочной в 1.5–3 раза. Сильноточная форма характеризуется линейно нарастающей ВАХ (кривая 200 Гц, рис. 3, а) с практически постоянным наклоном для всего диапазона амплитуды импульсов. В слаботочной форме разряда наклон ВАХ растет при увеличении амплитуды импульсов. Для частоты  $f_i \approx f_{i0}$  при малой амплитуде импульсов потенциала наблюдается сильноточная форма, которая с увеличением амплитуды переходит в слаботочную.

Для импульсов отрицательной полярности наблюдается только слаботочная форма разряда (рис. 3, б) во всем исследованном диапазоне частот следования импульсов. В этом случае ВАХ аналогична характеристике разряда для положительной полярности импульсов частотой  $f_i > f_{i0}$ . Таким образом, высокие значения амплитуды тока разряда УПГ и линейная ВАХ с постоянным наклоном регистрируются лишь для

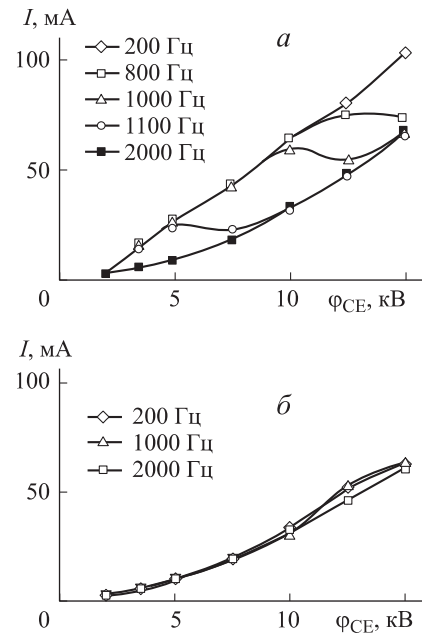


Рис. 3. Вольтамперные характеристики разряда УПГ при положительной (а) и отрицательной (б) полярности импульсов потенциала для разной частоты их следования. Давление воздуха  $p = 1$  торр

импульсов положительной полярности малой частоты ( $f_i < f_{i0}$ ). В этих условиях срабатывают механизмы, приводящие к увеличению тока разряда при той же амплитуде импульсов, а следовательно, к возрастанию вкладываемой в разряд импульсной мощности относительно положительных импульсов частотой  $f_i > f_{i0}$  или отрицательных импульсов всего исследованного диапазона частот.

Поведение сопротивления объема разряда УПГ при разной амплитуде импульсов также подтверждает существование двух форм разряда. В сильноточной форме минимальное сопротивление разряда в импульсе существенно меньше, чем в слаботочной. Полагая, что область свечения разряда соответствует области ионизованного газа и ее форма близка к усеченному конусу, из данных о сопротивлении разрядного столба можно рассчитать удельную проводимость плазмы  $\sigma$ , которая для сильноточной формы значительно меньше, чем для слаботочной. По проводимости плазмы можно оценить максимальную концентрацию заряженных частиц в течение импульса. Расчет показал, что сильноточной форме соответствует меньшая концентрация заряженных частиц, а это еще раз свидетельствует о менее благоприятных условиях возбуждения разряда в таком случае. Концентрация заряженных частиц устанавливается в результате динамического равновесия между процессами ионизации и гибели, которые различны для разной полярности импульсов.

Исследования спектра излучения разряда УПГ показали, что в сильноточной форме излучаются преимущественно полосы однократно ионизованных молекул азота  $N_2^+$  (1-я отрицательная система), а в слаботочной — полосы нейтральных молекул азота  $N_2$  (1-я и 2-я положительные системы). Это косвенно свидетельствует о более высокой температуре электронов в сильноточной форме.

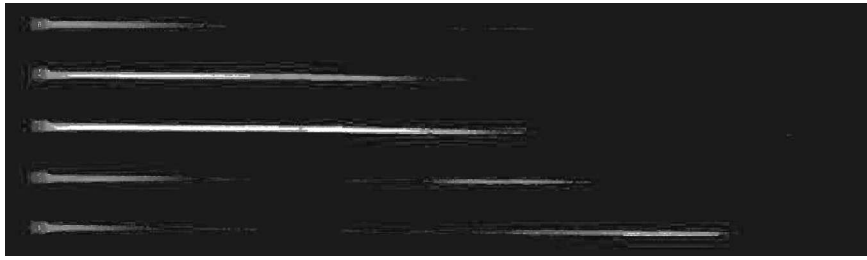


Рис. 4. Немонотонное распределение интенсивности интегрального излучения по длине разряда. Снимки сделаны с интервалом 0.2 с. Давление воздуха  $p = 0.5$  торр,  $\phi_{CE} = 10$  кВ,  $f_i = 720$  Гц

Переход от сильноточной формы к слаботочной при положительной полярности импульсов наблюдается в узком диапазоне частот шириной около 300 Гц. В области перехода ВАХ имеет участок с отрицательным сопротивлением, на котором повышение амплитуды импульсов потенциала приводит к уменьшению максимального тока разряда в импульсе (рис. 3, а). Это свидетельствует о возможности возникновения неустойчивости параметров разряда при переходе между формами. Действительно, при значениях частоты следования импульсов  $f_i \approx f_{i0}$  поведение разрядного столба при определенных условиях оказывается неустойчивым. Обнаружено периодическое изменение длины области свечения в течение времени при немонотонном распределении интенсивности интегрального излучения по длине разряда (рис. 4).

Период наблюдаемых колебаний составлял порядка нескольких секунд. Синхронно с периодическими изменениями длины разряда  $L_d$  регистрируются аналогичные изменения разрядного тока  $i_d$ .

### 3. Зависимость граничной частоты перехода между формами разряда УПГ от давления и амплитуды импульсов

Для заданной амплитуды импульсов потенциала  $\phi_{CE}$  определяли верхнюю (при увеличении частоты) и нижнюю (при уменьшении) граничную частоту перехода  $f_{i0}$  между формами разряда УПГ. При увеличении давления воздуха в трубке и верхняя и нижняя граничные частоты импульсов для фиксированной амплитуды импульсов сдвигаются в область больших частот. Увеличение амплитуды импульсов приводит к уменьшению граничной частоты.

Для определения характера величины, влияющей на изменение механизма разряда УПГ, исследована зависимость от давления амплитуды импульсов, при которой происходит переход от одной формы разряда к другой на верхней граничной частоте, равной  $f_{i0} = 1000$  Гц. Из полученных зависимостей (рис. 5) следует, что амплитуда импульсов на частоте перехода прямо пропорциональна давлению. Это свидетельствует о том, что отношение амплитуды импульсов к давлению  $\phi_{CE}/p$  постоянно для всего диапазона давлений при фиксированной граничной частоте. Оно составляет в среднем 7.3 кВ/торр для верхней граничной частоты и 5.5 кВ/торр для нижней граничной частоты. Отклонение от среднего не превосходит 8%.

Амплитуда импульсов потенциала определяет максимальное значение напряженности электрического поля в разрядной трубке, под действием которого проис-

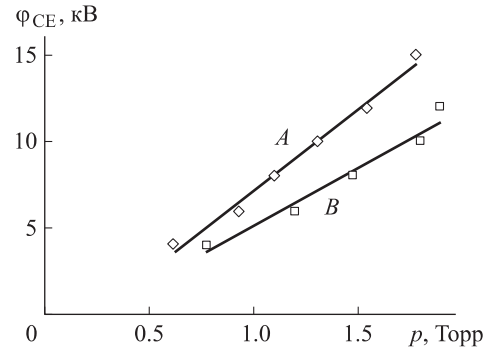


Рис. 5. Зависимости амплитуды импульсов  $\phi_{CE}$ , при которой происходит переход от сильноточной формы разряда УПГ к слаботочной (А) и наоборот (В) на частоте  $f_{i0} = 1000$  Гц от давления воздуха

ходит пробой газа. В результате можно предположить, что изменение механизма разряда на граничной частоте происходит при некотором пороговом значении приведенного электрического поля  $E/p$ , а следовательно, связано с изменением процессов ионизации. По аналогии с высокочастотными разрядами [1] можно сказать, что при переходе между формами разряда происходит пробой приэлектродного слоя в некотором критическом поле, когда включаются процессы ионно-электронной эмиссии.

Зависимость длины разряда от частоты следования импульсов при ее увеличении и уменьшении показывает, что в области перехода между формами разряда наблюдается гистерезис, т.е. граничная частота изменения длины разряда при увеличении частоты не совпадает с граничной частотой при ее уменьшении. При давлении  $p = 0.5$  торр явление гистерезиса выражено наиболее сильно. Как при уменьшении, так и при увеличении давления воздуха в трубке гистерезис уменьшается. Наблюдаемый гистерезис интенсивности свечения разряда сопровождается аналогичными изменениями и других его параметров, в частности тока разряда, вкладываемой в разряд мощности и т.п. [3].

Для газовых разрядов гистерезис характеристик довольно распространенное явление. Гистерезис в изменении интенсивности свечения плазмы при увеличении и уменьшении мощности ВЧ-генератора наблюдался, например, в области перехода ВЧ-разряда из моды с низкой плотностью плазмы в моду с высокой плотностью [5]. В качестве физической причины появления гистерезиса предполагалась нелинейная зависимость мощности, вложенной в плазму, от мощности ВЧ-генератора. Она является следствием нелинейной зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от

концентрации электронов и проявляется при условиях, когда эквивалентное сопротивление плазмы мало по сравнению с выходным сопротивлением генератора.

### Заклучение

Экспериментально установлено существование двух форм разряда униполярного пробоя газа в зависимости от частоты следования прикладываемых высоковольтных импульсов.

При низкой частоте следования импульсов положительной полярности наблюдается сильноточная форма разряда униполярного пробоя газа, характеризующаяся во всем исследуемом диапазоне амплитуды импульсов малыми размерами области и интенсивности свечения разряда, линейной вольтамперной характеристикой с практически постоянным сопротивлением разрядного столба и более низкой концентрацией заряженных частиц в плазме разряда.

При большой частоте следования импульсов для положительной полярности и во всем диапазоне частот для импульсов отрицательной полярности наблюдается слаботочная форма разряда униполярного пробоя газа, характеризующаяся большой длиной и интенсивностью излучения области свечения, нелинейной вольтамперной характеристикой и более высокой концентрацией заряженных частиц в плазме разряда.

Переход от одной формы разряда к другой для положительной полярности импульсов происходит рез-

ко в узком диапазоне частот и, по-видимому, связан с изменением характера ионизационных процессов в приэлектродных слоях, а именно с пробоем приэлектродного слоя в некотором критическом поле при включении процессов ионно-электронной эмиссии.

Частота перехода между формами растет с увеличением давления газа и уменьшением амплитуды импульсов. В области перехода наблюдается развитие неустойчивости разряда с частотой порядка 1 Гц, которая проявляется в виде периодического изменения длины разрядного столба и немономном распределении интенсивности свечения по его длине. При увеличении и уменьшении частоты генератора наблюдается гистерезис длины разрядного столба и других параметров разряда УПГ.

### Список литературы

1. Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высоочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения: Учеб. пособие. М., 1995.
2. Герасимов И.В. // ЖТФ. 1994. **65**. С. 30.
3. Герасимов И.В., Сухов А.К., Копейкина Т.П. // Вестн. КГУ им. Н. А. Некрасова. 2009. № 3. С. 30.
4. Савинов В.П., Сухов А.К., Копейкина Т.П. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2009. № 3. С. 56.
5. Александров А.Ф., Воробьев Н.Ф., Кралькина Е.А. и др. // Физика плазмы. 2007. **33**. № 9. С. 802.

## Two forms of the unipolar gas breakdown discharge existence

A. K. Sukhov

*N. A. Nekrasov Kostroma State University, 1-st May str. 14, Kostroma 156961, Russia.*

*E-mail: suhov\_andrei@mail.ru.*

Two forms of the unipolar gas breakdown discharge existence depending on the repetition frequency of the high-voltage pulses applied were experimentally established. Forms differ by intensity and distribution of a luminescence on length of the discharge and volt-ampere characteristics. The transition from one form of the discharge to another occurs in a narrow range of frequencies and is due to breakdown of near-electrode layer in a critical field for the inclusion of ion-electron emission. The transition frequency increases with the growth of gas pressure and the decrease of pulse amplitude. In the transition area the development of the discharge instability and the hysteresis of its parameters are observed.

*Keywords:* the unipolar gas breakdown discharge, discharge forms, high-voltage potential pulses, the pulse repetition frequency, a luminescence, the volt-ampere characteristic, the instability of a discharge column, the hysteresis.

PACS: 52.50.Dg, 52.50.Nr, 52.80.-s, 52.80.Tn.

*Received 3 October 2012.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin 2(2013).*

### Сведения об авторе

Сухов Андрей Константинович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел. (4942)-39-16-61, e-mail: suhov\_andrei@mail.ru.